

5

№ 201 1940

698

Свердловское отделение ВНИТОлес

625

М. М. КОРУНОВ

К.698

# РАСЧЕТ ЛЕДЯНЫХ ПЕРЕПРАВ

На дом не выдается

Свердловское отделение ВНИТОлес

М. М. КОРУНОВ

# РАСЧЕТ ЛЕДЯНЫХ ПЕРЕПРАВ



МОСКВА

ГОСЛЕСТЕХИЗДАТ

1940

37 200

*2n*

*902/11*

*мбч*

13 0988 "

1 61 0 0 1

*1*

07 0 0 0 0

*мбч*

16 АПР 2002

20 ФЕВ 2003

- 1. 0 1. 2013

*мбч*

02. 0 7. 2024 02

В работе освещается методика расчета ледяных переправ, приведены основные формулы и примеры расчетов. Книга рассчитана на инженеров, техникум механизированного лесотранспорта и студентов.

ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
НАУЧНАЯ  
КНИЖНО-ТОРГОВАЯ  
Фирма «Книжки»

3154/31  
40

625  
К.608

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие . . . . .	3
Глава I. Расчет продолжительности образования ледяного покрова . . . . .	4
1. Процесс образования ледяного покрова . . . . .	4
2. Формула проф. Стефана . . . . .	5
3. Формула проф. Барнеса . . . . .	5
4. Некоторые физические свойства льда . . . . .	5
5. Сравнение формул Стефана и Барнеса и примеры расчетов . . . . .	6
6. Продолжительность образования ледяного покрова на Дерекатах . . . . .	9
7. Другие условия образования ледяного покрова . . . . .	10
Глава II. Расчет толщины ледяного покрова и величины перевозимого по нему груза . . . . .	11
8. Некоторые механические свойства льда . . . . .	11
9. Расчет льда по методу инж. Бернштейна . . . . .	12
10. Расчет льда по методу аналогии . . . . .	16
11. Особенность расчета льда соленоводных водоемов . . . . .	18
12. Расчет льда для поездной вывозки . . . . .	19
13. Нормы толщины льда для некоторых тягачей . . . . .	20
14. Сравнение методов расчета . . . . .	20
15. Применение метода инж. Бернштейна к расчету льда для тракторных и автогужевых дорог . . . . .	22
16. Сравнение теоретических расчетов с практическими данными . . . . .	23
17. Некоторые выводы из практики работы железнодорожных ледяных переправ . . . . .	24
18. Некоторые вопросы изыскания ледяных переправ . . . . .	24
Глава III. Увеличение прочности ледяного покрова . . . . .	25
19. Верхнее строение пути по льду . . . . .	25
20. Искусственное намораживание льда . . . . .	28
21. Деформация ледяного покрова в связи с изменением температуры воздуха . . . . .	30
Выводы . . . . .	31
Литература . . . . .	32

М. М. Корунов

М. М. Корунов, „Расчет ледяных переправ“, Москва, Гослестехиздат, 1940 г.

Отв. редактор А. В. Морозов  
Лит. редактор Е. Л. Питерман  
Сдано в наб. 26/III 1940 г.  
Объем 2 п. л., 2,15 уч. а. л.  
Индекс 4240  
Тираж 3000 экз.

Техн. редактор С. И. Шмелькина  
Подписано к печати 9/VI 1940 г.  
Формат бумаги 60×92<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Знаков в печ. л. 46256  
Изд. № 61

Уполн. Мособлгорлита Б-8140

5-я тип. Трансжелдориздата. Москва, Каланчевский тупик, д. 3/5. Зак. 310.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В практике сухопутного транспорта, как рельсового, так и особенно безрельсового, для перевозок грузов машинами и гужом часто приходится пользоваться льдом рек и озер.

При проектировании такого рода ледяных переправ инженерно-технический персонал нередко встречает затруднения в методике расчета, и вопросы в этом отношении решаются на основании опыта и подчас не совсем верно. Известны примеры, когда из-за отсутствия учета ряда условий, связанных с эксплуатацией ледяных переправ, тракторы, автомашины погружались под лед; иногда эти катастрофы сопровождались человеческими жертвами.

В этой работе освещены три основных вопроса:

- 1) расчет продолжительности образования ледяного покрова;
- 2) расчет толщины льда и веса перевозимого по нему груза;
- 3) увеличение прочности ледяных переправ.

В работе даны основные формулы и примеры расчетов. Формулы приведены без математических выводов, которые значительно увеличили бы объем работы; кроме того, автор преследовал исключительно практическую сторону дела.

## РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

## § 1. Процесс образования ледяного покрова

Наибольшая плотность воды соответствует, как известно, температуре  $+4^{\circ}\text{C}$ ; поэтому каждая частица воды, охлажденная на поверхности до  $+4^{\circ}\text{C}$ , как более тяжелая, падает на дно. Следовательно, образование поверхностного слоя с температурой меньше  $+4^{\circ}\text{C}$  возможно только тогда, когда вся масса воды охладится до  $+4^{\circ}\text{C}$ . После этого частицы с меньшей температурой, как более легкие, остаются на поверхности, где и идет уже их дальнейшее охлаждение до  $0^{\circ}$ . Для образования кристаллов льда, кроме охлаждения воды до  $0^{\circ}$ , необходимо, чтобы каждый грамм воды выделил скрытую теплоту плавления льда  $\lambda$ , равную 80 калориям. На поверхности водоема сначала образуется тончайшая ледяная пленка, утолщающаяся по мере передачи через нее тепла снизу (из воды) в атмосферу. Теплопроводность льда играет здесь очень большую роль, а так как эта теплопроводность невелика, то с увеличением толщины льда дальнейшее его утолщение все более и более замедляется. Рост льда в зависимости от температуры воздуха будет еще более замедляться вследствие выпадения на лед снега и постепенного увеличения его толщины.

Рост льда в открытых водоемах имеет большое практическое значение, и этим вопросом занимались многие русские и иностранные исследователи.

Все существующие методы определения закономерностей изменения с течением времени толщины ледяного покрова проф. Б. П. Вейнберг<sup>(2)\*</sup> разделяет на три категории: геофизическо-эмпирические, энергетическо-эмпирические и климатологическо-эмпирические.

Особо от указанных стоит физико-математический метод проф. Стефана.

Не вдаваясь в оценку различных методов, рассмотрим вкратце физико-математическую формулу проф. Стефана и полуэмпирическую формулу проф. Барнеса. Формулы Барнеса и Стефана наиболее распространены в литературе, и результаты, получающиеся при расчетах по ним, мало отличаются друг от друга.

\* Цифры в скобках—ссылка на литературу, помещенную в конце брошюры.

## § 2. Формула проф. Стефана

Тепловой поток, проходящий через слой льда, до некоторой степени подчиняется формуле Фурье. Если в ледяном покрове выделить вертикальный столб с сечением, равным единице, то для него формула Фурье может быть представлена в следующем виде:

$$dh\lambda d = \frac{k\theta dt}{n}$$

где:

- $h$  — толщина слоя льда в см,
- $\theta$  — температура воздуха в  $^{\circ}\text{C}$ ,
- $k$  — коэффициент теплопроводности льда,
- $\lambda$  — теплота плавления льда,
- $d$  — плотность льда,
- $dt$  — время замерзания в сек.

В этом уравнении левая часть означает количество калорий, отдаваемых водой при толщине слоя  $dh$  в течение времени  $dt$ . Интегрируя это уравнение и решая его относительно  $t$ , получим:

$$t = \frac{\lambda dh^2}{2k\theta} \text{ сек.},$$

а в сутках:

$$t = \frac{\lambda dh^2}{2k\theta 86400} \text{ сут.}$$

Толщина слоя льда, образующаяся за  $t$  суток при средней суточной температуре воздуха  $\theta^{\circ}\text{C}$ , будет:

$$h = \sqrt{\frac{2k\theta t \cdot 86400}{\lambda d}} \text{ см.}$$

## § 3. Формула проф. Барнеса

Для определения продолжительности образования ледяного покрова стоячих озер и медленно текущих рек проф. Барнес<sup>(13)</sup> предложил пользоваться следующей полуэмпирической формулой:

$$t = \frac{\lambda dh}{k\theta} \left(1 + \frac{h}{2}\right) \text{ сек.},$$

где условные обозначения те же, что и в формуле проф. Стефана.

## § 4. Некоторые физические свойства льда

Чтобы пользоваться формулами Стефана и Барнеса, необходимо знать некоторые средние значения, относящиеся к плотности льда, его теплопроводности и другим свойствам.

Плотность льда. Среднюю плотность  $d$  чистого речного льда считают равной 0,917 при 0° Ц. Плотность водно-снегового льда меньше плотности речного и равна примерно 0,80 при 0° Ц. Известно, что объем льда при понижении температуры уменьшается и, следовательно, его плотность повышается. Средний коэффициент объемного расширения льда при температуре от 0 до 20° Ц равен  $\beta = 0,000165$ . Плотность речного льда, соответствующая температуре  $\theta = -20^\circ \text{Ц}$ , будет равна:

$$d = \frac{0,917}{1 - \beta\theta} = \frac{0,917}{1 - \beta \cdot 20} = \frac{0,917}{0,9966} = 0,920.$$

В дальнейших расчетах везде принята плотность льда  $d = 0,920$ .

Теплопроводность льда. Коэффициент теплопроводности льда увеличивается с понижением температуры. Для температуры в пределах 0—20° Ц принимают коэффициент теплопроводности  $k$  равным 0,005, который и положен в основу дальнейших расчетов.

Скрытая теплота плавления льда. Как показывают многочисленные исследования, величина скрытой теплоты льдообразования  $\lambda$  равна 80 кал., что и принято в дальнейших расчетах.

### § 5. Сравнение формул Стефана и Барнеса и примеры расчетов

Стефан получил свою формулу чисто математическим путем. Барнес же теоретическо-практическим, поэтому и формула его называется полуэмпирической. Сравнив формулы Стефана и Барнеса, видим, что для одних и тех же условий по формуле Стефана получается несколько меньший результат, чем по формуле Барнеса:

$$t = \frac{\lambda dh}{k\theta} + \frac{\lambda dh^2}{2k\theta} \text{ сек.},$$

по Стефану:

$$t = \frac{\lambda dh^2}{2k\theta} \text{ сек.}$$

Если время образования ледяного покрова выразить в сутках, то, подставляя указанные ранее значения для  $\lambda$ ,  $d$  и  $k$ , получим:

по Барнесу:

$$t = \frac{\lambda dh}{k \cdot \theta \cdot 86400} \left(1 + \frac{h}{2}\right) = \frac{80 \cdot 0,92 \cdot h}{0,005 \cdot 86400 \theta} = \left(1 + \frac{h}{2}\right) = \frac{h}{5,87\theta} \left(1 + \frac{h}{2}\right) \text{ сут.}$$

по Стефану:

$$t = \frac{\lambda dh^2}{2k \cdot \theta \cdot 86400} = \frac{80 \cdot 0,92 \cdot h^2}{2 \cdot 0,005 \cdot \theta \cdot 86400} = \frac{h^2}{11,7\theta} \text{ сут.}$$

и

$$h = \sqrt{11,7\theta t} = 3,4 \sqrt{\theta t} \text{ см.}$$

Для практических расчетов Стефан рекомендовал пользоваться формулой:

$$h_s = 3 \sqrt{\theta t} \text{ см}$$

и, следовательно,

$$t = \frac{h^2}{9\theta} \text{ сут.}$$

Рассмотрим получающиеся по формулам результаты на некоторых примерах.

*Пример 1.* Определить продолжительность образования ледяного покрова толщиной  $h = 10$  см при средней температуре воздуха  $\theta = -10^\circ \text{Ц}$ .

*Решение.*

1. По теоретической формуле Стефана:

$$t = \frac{h^2}{11,7\theta} = \frac{10^2}{11,7 \times 10} = \frac{100}{117} = 0,85 \text{ сут.}$$

2. По практической формуле Стефана:

$$t = \frac{h^2}{9\theta} = \frac{10^2}{9 \times 10} = \frac{100}{90} = 1,11 \text{ сут.}$$

3. По полуэмпирической формуле Барнеса:

$$t = \frac{h}{5,84\theta} \left(1 + \frac{h}{2}\right) = \frac{10}{5,84 \times 10} \left(1 + \frac{10}{2}\right) = 1,03 \text{ сут.}$$

Результаты сопоставлений помещены в табл. 1.

Таблица 1

Формулы	Продолжительность в сутках	В %
Барнеса	1,03	100
Стефана, теоретическая	0,85	82,5
Стефана, практическая	1,11	107,7

В дальнейших вычислениях будем пользоваться практической формулой Стефана, которая, как видно, имеет сравнительно небольшие расхождения с формулой Барнеса.

**Пример 2.** Определить продолжительность образования ледяного покрова толщиной  $h_1 = 10$  см,  $h_2 = 20$  см,  $h_3 = 30$  см,  $h_4 = 40$  см и  $h_5 = 50$  см при среднесуточных температурах воздуха  $\theta_1 = -10^\circ \text{Ц}$ ,  $\theta_2 = -20^\circ \text{Ц}$ ,  $\theta_3 = -30^\circ \text{Ц}$  и  $\theta_4 = -40^\circ \text{Ц}$ .

**Решение.**

Произведя соответствующие вычисления по практической формуле Стефана, получим следующие данные (табл. 2).

Таблица 2

$h$ см	Продолжительность образования ледяного покрова в сутках при температуре воздуха			
	$-10^\circ$	$-20^\circ$	$-30^\circ$	$-40^\circ$
10	1,1	0,55	0,4	0,3
20	4,4	2,2	1,4	1,1
30	10,0	5,0	3,3	2,5
40	17,7	8,8	5,9	4,4
50	27,8	13,9	9,3	6,9

Графически зависимость  $h$  от  $\theta$  приведена на рис. 1.

**Пример 3.** Определить толщину льда, которая может образоваться при средней температуре воздуха  $\theta = 16^\circ \text{Ц}$  за 4 суток.

**Решение:**

$$h = 3\sqrt{\theta t} = 3\sqrt{16 \times 4} = 24 \text{ см.}$$

**Пример 4.** В Свердловской области средняя температура воздуха  $\theta$  в ноябре равна  $-8^\circ \text{Ц}$ . Расчетom установлено, что груз весом  $Q = 16$  т можно перевозить при толщине льда  $h = 24$  см. Требуется ориентировочно установить, через сколько суток и когда можно приступить к перевозке груза через озеро.

**Решение.**

Пользуясь формулой Стефана, получим число суток ноября:

$$t = \frac{h^2}{9\theta} = \frac{24^2}{9 \times 8} = \frac{576}{72} = 8.$$

Рис. 1. Время образования ледяного покрова рек и озер

Таким образом, перевозка по льду будет возможна с 9—10 ноября<sup>1</sup>. Приведенный расчет справедлив при полном отсутствии снега на поверхности льда.

<sup>1</sup> В примере условно принята температура воздуха в течение первой декады ноября, равная среднемесячной температуре, и начало замерзания озера с 1 ноября.

## § 6. Продолжительность образования ледяного покрова на перекатах

Формулы Стефана и Барнеса относятся к образованию льда озер и медленно текущих рек. Продолжительность образования льда толщиной  $h$  см для одной и той же реки будет различная на плесах и перекатах. В местах с более быстрым течением (перекатах) вода при равных прочих условиях замерзает медленнее. Толщина льда на перекатах и время его образования могут быть определены по формуле инж. Быдина<sup>(1)</sup>:

$$h = 2\sqrt{\Sigma\theta} \text{ см,}$$

где  $\Sigma\theta$  — сумма среднесуточных температур воздуха, взятая с положительным знаком.

Так как эта сумма температур равна произведению из средней суточной температуры воздуха на число суток

$$\Sigma\theta = t\theta,$$

где  $t$  — число суток, то

$$h = 2\sqrt{\theta t} \quad \text{и} \quad t = \frac{h^2}{4\theta} \text{ сут.}$$

Как видно, формула инж. Быдина представляет собою видоизмененную формулу Стефана, в которой постоянное число 3 заменено числом 2.

Проверка этой формулы, проведенная на реке Павде в Свердловской области в течение двух месяцев под руководством инж. Соколовского<sup>(10)</sup>, показала, что фактические данные образования ледяного покрова сравнительно мало отличаются от расчетных, полученных на основании приведенной формулы. Время образования одной и той же толщины ледяного покрова на плесах и на перекатах относится между собой, как

$$t : t_1 = \frac{h^2}{9\theta} : \frac{h^2}{4\theta} = \frac{4}{9},$$

откуда

$$t : = \frac{9t}{4} = 2,25t.$$

Приведенное отношение показывает, что для образования одной и той же толщины ледяного покрова на местах перекатов потребуется при одинаковой температуре в 2,25 раза больше времени, чем для обычных мест (плесов). Толщина ледяного покрова на местах перекатов будет всегда меньше, чем на местах плесов, так как

$$h : h_1 = 3\sqrt{\theta t} : 2\sqrt{\theta t},$$

откуда

$$h = 1,5 h_1,$$

т. е. средняя толщина льда в обычных местах в полтора раза больше средней толщины льда на перекатах.

Продолжительность образования в сутках соответствующей толщины ледяного покрова на перекатах при различной средней температуре воздуха представлена в табл. 3 и на рис. 2.

Таблица 3

h см	Время в сутках при температуре в °C			
	-10	-20	-30	-40
10	2,50	1,25	0,75	0,62
20	10,0	5,0	3,33	2,50
30	22,50	11,25	7,50	5,62
40	40,0	20,0	13,33	10,0
50	62,5	31,25	20,71	15,62

### § 7. Другие условия образования ледяного покрова

Все многообразие водного режима рек и озер, а следовательно, и условий образования ледяного покрова, не может быть учтено приведенными формулами.

Время, необходимое для образования ледяного покрова той или иной толщины для соленоводных водоемов при одинаковых прочих условиях, будет больше, чем для пресноводных водоемов.

Это относится и к рекам, имеющим в своем составе растворенные гуминовые кислоты.

В устьях родников, впадающих в реки, лед всегда тоньше, а иногда реки у берегов в таких местах совсем не замерзают. Имеются реки, не замерзающие в зимний период при достаточно большой общей сумме отрицательных температур воздуха. В дальнейших расчетах предусмотрено, что лед является плавающим на воде телом. Для многих рек и озер это положение в основ-

ном верно. Однако в некоторых случаях, например на малых реках, ледяной покров образуется в виде своеобразных „арочных“ мостов.

Так, в феврале 1939 г. в Лобвинском леспромхозе Свердловской области трактор пошел под лед при переправе через небольшую речку Каменку. В этом случае лед не был на плаву, а опирался на берега толстыми (до 1 м) концами; средняя же часть ледяного покрова была приподнята над водой на 0,5 м. При ширине реки 10—12 м ледяной покров в этом случае представлял своеобразный арочный мост (рис. 3). Эти особенности образования ледяного покрова необходимо учитывать при проектировании ледяных переправ.

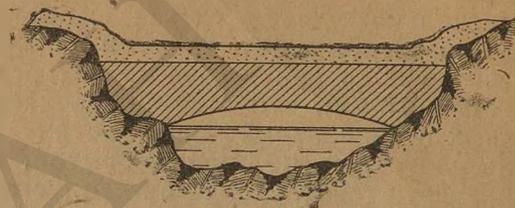


Рис. 3. Ледяной арочный мост

## Глава II

### РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА И ВЕЛИЧИНЫ ПЕРЕВОЗИМОГО ПО НЕМУ ГРУЗА

#### § 8. Некоторые механические свойства льда

Лед как пластичный и вязкий материал дает под действием нагрузки упругие и остаточные деформации. Опытами установлено, что при повышении температуры лед становится более пластичным и податливым под действием разного рода нагрузок. Однако механические свойства льда зависят не только от температуры, но в очень сильной мере от химического состава воды. Опытами доказано, что лед соленоводных водоемов имеет механические качества в два-три раза ниже, чем пресноводный лед. В ледяных переправах лед под действием нагрузок изгибается, поэтому прежде всего необходимо знать величину разрушающего напряжения льда при изгибе. Разрушающее напряжение льда на изгиб колеблется в весьма широких пределах. По данным испытаний проф. Пинегина (1928—1933 гг.) и лаборатории Института инж. путей сообщения (1897 г.) (6), среднюю величину разрушающего напряжения речного льда на изгиб  $\sigma$  можно принять равной  $33 \text{ кг/см}^2$ . Максимальное значение разрушающего напряжения речного льда на изгиб, по исследованиям (1916 г.) механической лаборатории Рязано-Уральской жел. дор. в г. Саратове, было получено  $\sigma_{\text{max}} = 60 \text{ кг/см}^2$  при температуре  $\pm 4 \div +13^\circ \text{C}$ . В дальнейших расчетах мы приняли допускаемое напряжение льда на изгиб  $\sigma$  равным  $12 \text{ кг/см}^2$ ; коэффициент надежности  $n$  составляет:

для максимального значения разрушающего напряжения:

$$n = \frac{60}{12} = 5,$$

для среднего значения разрушающего напряжения льда на изгиб:

$$n_1 = \frac{33}{12} = 2,75.^1$$

Насколько удачно сделан выбор допускаемого напряжения льда на изгиб, будет видно в дальнейшем. Модуль упругости пресного льда при изгибе принят равным  $\varepsilon = 30\,000 \text{ кг/см}^2$ , или  $\varepsilon = 300\,000 \text{ т/м}^2$ , что отвечает среднему значению большинства данных исследований механических свойств речного льда. Модуль упругости, по данным опытов, возрастает с понижением температуры воздуха. Кроме допускаемого напряжения льда на изгиб и модуля упругости, некоторое значение в расчетах имеет коэффициент Пуассона для льда. Коэффициент Пуассона, по опытам проф. Пинегина, колеблется от  $1/4$  до  $1/2$  и даже больше. При понижении температуры коэффициент Пуассона увеличивается <sup>2</sup>. Если коэффициент Пуассона обозначить через  $\frac{1}{m}$ , то  $m$  будет величина, обратная коэффициенту Пуассона. В дальнейших расчетах принимаем среднее значение  $m = 3$ .

### § 9. Расчет льда по методу инж. Бернштейна

Расчет льда усложняется тем, что механические свойства его изучены сравнительно слабо, недостаточно изучена и работа ледяного покрова как под статическими, так и под динамическими нагрузками.

Впервые теория работы ледяного слоя под нагрузкой и способ расчета ледяного слоя с достаточной полнотой была разработана инж. Бернштейном <sup>(8)</sup>. Инж. Бернштейн предложил применить имеющиеся формулы расчета круглых пластинок неограниченных размеров с нагрузкой, распределенной по кругу. Инж. Бернштейн рассматривает ледяной покров как плавающее тело без учета береговых опорных реакций. Говорить о полном береговом опирании льда нельзя, так как на долю берегов приходится ничтожная часть опорной реакции. Иногда вследствие падения горизонта воды береговые части льда разламываются продольными трещинами. При этом нарушается и без того слабое опирание льда на берег и связь его со срединными

<sup>1</sup> Следует подчеркнуть, что механические свойства льда зависят от многих факторов, среди которых важнейшие: направление действия внешних сил (совпадает ли действие сил с осью кристаллов льда), величина отрицательных температур, структура льда, время действия нагрузки. Б. П. Вейнберг получил для одинаковых условий испытаний, но для различных кусков одного и того же речного льда разрушающее напряжение при изгибе от 4 до 29,6 кг/см<sup>2</sup>. В опытах Пинегина (1922 г.) среднее разрушающее напряжение при изгибе колебалось от 18 до 33 кг/см<sup>2</sup>. Поэтому принятые в настоящей работе значения и коэффициенты, характеризующие лед, весьма приближены и носят условный характер; тем более что приходится пользоваться формулами и теорией сопротивления материалов, справедливой лишь для изотропных тел, следующих закону Гука. *Ред.*

<sup>2</sup> Коэффициент Пуассона для льда увеличивается также с увеличением нагрузки. *Ред.*

областями. Теория Бернштейна построена на следующих положениях, подтвержденных экспериментальными работами:

- 1) между нагрузкой и деформацией льда существует связь, близкая к пропорциональности;
- 2) отсутствие остаточных деформаций льда при кратковременном действии нагрузки;
- 3) применимость закона Гука ко льду при малых напряжениях;
- 4) при кратковременном действии нагрузки явление вязкости льда не успевает проявиться.

Упругие свойства льда в основном характеризуются его толщиной  $h$ , модулем упругости  $\varepsilon$  и коэффициентом Пуассона  $\frac{1}{m}$ .

На основе своих опытов инж. Бернштейн вывел следующую формулу для определения максимальной величины допускаемой нагрузки на лед:

$$Q_{\max} = \frac{\sigma_{\max} h^2 m}{3(m+1)C(a)}$$

где:

- $Q_{\max}$  — вес груза в тоннах,
- $\sigma_{\max}$  — допускаемое напряжение льда на изгиб, равно  $22 \text{ кг/см}^2$ ,
- $h$  — толщина льда в м,
- $m$  — величина, обратная коэффициенту Пуассона, и
- $C(a)$  — характеристика удельного напряжения льда.

Сложность расчета льда по методу инж. Бернштейна и заключается в определении значения  $C(a)$ . Последовательность нахождения  $C(a)$  и определения величины веса груза такова.

1. Сначала определяют характеристику льда  $l$ , имеющую размерность длины в м

$$l = \sqrt[4]{\frac{m^2}{m^2-1} \frac{\varepsilon h^3}{12}} \text{ м.}$$

При  $m = 3$  и  $\varepsilon = 300\,000 \text{ т/м}^2$  после соответствующих подстановок и сокращений получим:

$$l = \sqrt[4]{\frac{3^2}{3^2-1} \frac{300\,000 \cdot h^3}{12}} = \sqrt[4]{28\,125 h^3} \text{ м.}$$

Численные значения  $l$  в зависимости от  $h$  представлены в табл. 4.

Таблица 4

$h \text{ м}$	$l \text{ м}$	$h \text{ м}$	$l \text{ м}$
0,1	2,30	0,8	10,92
0,2	3,87	0,9	11,95
0,3	5,20	1,0	12,94
0,4	6,50	1,1	13,26
0,5	7,70	1,2	13,52
0,6	8,83	1,5	14,40
0,7	9,91		

Кривая характеристики льда приведена на рис. 4.

2. Затем определяют так называемый приведенный радиус распределения нагрузки. Опытами установлено, что давление от подвижного состава на лед распределяется по площади эллипса, у которого полуосями являются половина ширины хода и половина продольной базы подвижного состава.

В теории расчета инж. Бернштейна площадь эллипса рас-

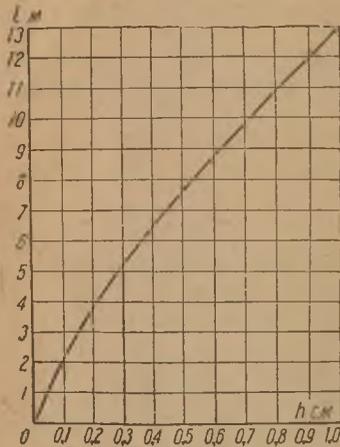


Рис. 4. Кривая характеристики льда

пределения нагрузки заменена равновеликой площадью круга. Следовательно, при ширине хода подвижного состава  $b$  и длине продольной базы  $L$  радиус приведенного круга распределения нагрузки будет равен среднему геометрическому из  $\frac{b}{2}$  и  $\frac{L}{2}$ .

т. е.

$$r = \sqrt{\frac{b}{2} \cdot \frac{L}{2}} \text{ м.}$$

3. Определив  $l$  и  $r$ , находят характеристику распределения нагрузки, которая равна:

$$a = \frac{r}{l}$$

4. По найденной характеристике распределения нагрузки  $a$ , пользуясь специальным графиком на рис. 5, определяют характеристику удельного напряжения  $C(a)$ .

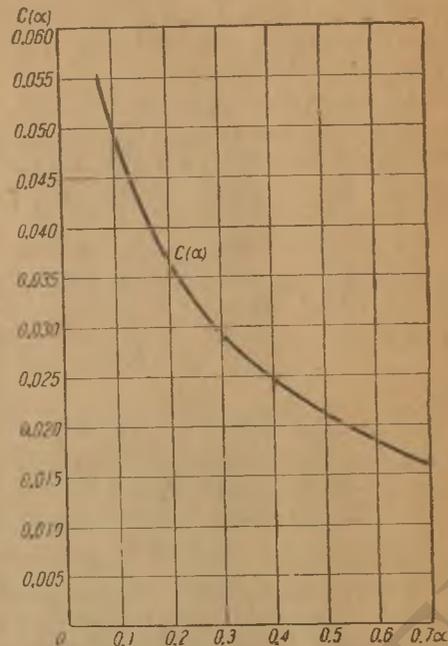


Рис. 5. Кривая удельного напряжения льда

5. Наконец, подсчитывают величину груза

$$Q_{\max} = \frac{\sigma_{\max} h^2 m}{3(m+1) \cdot C(a)}$$

Кажущееся несоответствие размерностей в некоторых формулах объясняется тем, что при выводе в них опущен фактор  $k = 1$ , имеющий размерность  $k = m/m^2$ .

При  $\sigma = 12 \text{ кг/см}^2$  и  $m = 3$  получим

$$Q = \frac{3h^2}{C(a)} m.$$

Метод расчета инж. Бернштейна легче всего уяснить на конкретных примерах.

*Пример 5.* Газогенераторный трактор ЧТЗ СГ-65 имеет ширину  $b = 2,4 \text{ м}$ , длину  $L = 4,37 \text{ м}$ . Вес трактора в рабочем состоянии  $Q = 12 \text{ т}$ . Определить возможность движения трактора по льду толщиной  $h = 40 \text{ см}$ .

*Решение.*

Характеристика льда:

$$l = \sqrt{28\,125 h^3} = \sqrt{28\,125 \cdot 0,4^3} = 6,5 \text{ м.}$$

Приведенный радиус распределения нагрузки

$$r = \sqrt{\frac{b}{2} \cdot \frac{L}{2}} = \sqrt{\frac{2,4}{2} \cdot \frac{4,37}{2}} = 1,62 \text{ м.}$$

Характеристика распределения нагрузки

$$a = \frac{r}{l} = \frac{1,62}{6,50} = 0,25.$$

По графику  $a = 0,25$  соответствует величина удельного напряжения льда

$$C(a) = 0,0325.$$

Возможная величина груза будет равна:

$$Q = \frac{3h^2}{C(a)} = \frac{3 \cdot 0,4^2}{0,0325} = \frac{0,48}{0,0325} = 14,8 \text{ т.}$$

Следовательно, движение трактора весом  $Q = 12 \text{ т}$  при толщине льда  $h = 40 \text{ см}$  вполне возможно.

*Пример 6.* Определить, какой вес груза брутто можно перевозить автомашиной с полуприцепом, если длина дышла полуприцепа равна  $L = 4 \text{ м}$ , ширина хода  $b = 1,45 \text{ м}$ .

Величину веса груза требуется установить для толщины льда в 5, 10, 20, 30 и 40 см.

*Решение.*

Решая этот пример по аналогии с предыдущим, получим следующие данные (табл. 5).

Таблица 5

$h$ м	$l$ м	$r$ м	$\alpha$	$C(\alpha)$	$Q$ в т
0,05	1,80	1,22	0,68	0,016	0,4
0,10	2,30	1,22	0,53	0,020	1,5
0,20	3,87	1,22	0,31	0,028	4,3
0,30	5,20	1,22	0,23	0,034	7,9
0,40	6,50	1,22	0,19	0,036	13,3

### § 10. Расчет льда по методу аналогии

Из теории сопротивления материалов (11) известно, что при изгибе пластинки по цилиндрической поверхности напряжение получается точно так же, как и в бруске прямоугольного поперечного сечения  $1 \times h$ , т. е.

$$\sigma = \frac{12MZ}{h^3},$$

где:

$h$  — высота бруска,

$M$  — изгибающий момент, приходящийся на поперечное сечение элементарной полоски, ширина которой принята за единицу,

$Z$  — расстояние элементарной полоски срединной плоскости.

Максимальное значение  $\sigma_{\max}$  при  $Z = \frac{h}{2}$  равно:

$$\sigma_{\max} = \frac{6M}{h^2}.$$

Максимальное напряжение можно определить также по формуле:

$$\sigma_{\max} = \frac{Mh}{2I},$$

где  $I$  — момент инерции,

$$I = \frac{bh^3}{12}.$$

Приняв  $b=1$ , получим:

$$\sigma_{\max} = \frac{6M}{h^2}.$$

Величина изгибающего момента при сосредоточенной нагрузке пропорциональна этой нагрузке, т. е.

$$\sigma_{\max} = \frac{6Q}{h^2}.$$

Для одной и той же величины  $\sigma_{\max}$  получим:

$$\frac{Q}{h^2} = \frac{Q_1}{h_1^2}$$

или

$$\frac{h^2}{h_1^2} = \frac{Q}{Q_1},$$

т. е. возникающие во льду напряжения обратно пропорциональны его толщине. Отсюда, если опытным путем установлена для определенной толщины  $h$  величина груза  $Q$ , то, пользуясь приведенным уравнением, можно найти для любого груза  $Q_1$  необходимую толщину ледяного покрова  $h_1$ . Так, опытами установлено, что для посадки самолета весом  $Q=6$  т на пресный лед крепкого кристаллического строения равномерной толщины по всей рабочей площади ледяного покрова без вымоин, трещин и полыней требуется толщина льда не менее 24 см (\*). На этом основании можно написать:

$$\frac{h^2}{24^2} = \frac{Q}{6},$$

откуда

$$h = 24 \sqrt{\frac{Q}{6}} \text{ см}$$

и

$$Q = \frac{6h^2}{24^2} = \frac{6h^2}{576} \text{ т.}$$

Для упрощения расчета приведенную формулу можно представить в таком виде:

$$h = 10 \sqrt{Q} \text{ см}$$

Т.к.  $\sqrt{6} \approx 2,45$

и

$$Q = \frac{h^2}{100} \text{ т.}$$

Разница в результатах расчета получается незначительная: так, для  $Q=36$  т будем иметь

$$h = 24 \sqrt{\frac{36}{6}} = 58,8 \text{ см,}$$

$$h_1 = 10 \sqrt{Q} = 10 \sqrt{36} = 60 \text{ см.}$$

Разница составляет лишь 2% в сторону увеличения, что можно вполне допустить для практических расчетов. Толщина пресно-

водного льда для соответствующего веса груза  $Q$ , вычисленная по формуле  $h=10\sqrt{Q}$  см, представлена в табл. 6.

Таблица 6

$Q$ в т	$h^*$ см	$Q$ в т	$h^*$ см
1	10	11	33
2	14	12	35
3	17	13	36
4	20	14	37
5	22	15	39
6	24	16	40
7	26	17	41
8	28	18	42
9	30	19	43
10	32	20	45

\*  $h$  принята везде с округлением.

Для соленоводных водоемов толщина льда при одинаковых прочих условиях должна быть больше.

Графически зависимость  $h$  от веса груза приведена на рис. 6.

### § 11. Особенность расчета льда соленоводных водоемов

Раньше было указано, что лед соленоводных водоемов в 2—3 раза (\*) уступает по прочности пресноводному льду. Нагрузки на лед относятся друг к другу как соответствующие толщины льда в квадрате; поэтому при расчете необходимой толщины соленоводного льда должна быть учтена соответствующая поправка. Формула для расчета необходимой толщины льда будет иметь следующий вид:

$$h_{\text{сол}} = h_{\text{прес}} \cdot \sqrt{3} = 10\sqrt{3Q} \text{ см.}$$

В табл. 7 приведена сравнительная толщина льда пресноводных и соленоводных водоемов для соответствующих нагрузок.

Таблица 7

Нагрузка $Q$ в т	Толщина льда $h$ см	
	пресная вода	соленая вода
6	24	41
12	35	59
18	42	72
24	49	81
30	55	95

## § 12. Расчет льда для поездной вывозки

Все рассмотренные расчеты относятся к случаям одиночно движущихся тягачей или тягачей с 1—2 прицепами. Если же по льду должны передвигаться целые поезда, следует проверить лед на прочность не только для движения по нему тягача, но и всего поезда в целом. В зависимости от веса тягача и веса прицепов в одном случае необходимо делать расчет по весу тягача, а в другом случае—по длине поезда.

Для случая движения по льду поезда инж. Бернштейн рекомендует применять метод, аналогичный расчету льда для одиночных машин и прицепов. Разница лишь в том, что здесь берется не продольная база подвижного состава, а длина всего поезда. Задачу решают в такой последовательности.

Определяют характеристику льда для заданной его толщины:

$$l = \sqrt[4]{28125h^3} \text{ м.}$$

Находят радиус приведенного круга распределения нагрузки в зависимости от ширины хода подвижного состава и длины поезда:

$$r = \sqrt{\frac{b}{2} \cdot \frac{L}{2}} \text{ м.}$$

Определяют коэффициент распределения нагрузки

$$\alpha = \frac{r}{l^4}.$$

По коэффициенту  $\alpha$  устанавливают значение  $C(\alpha)$ .

Наконец, по найденному значению  $C(\alpha)$  подсчитывают величину груза  $Q$ ;

$$Q = \frac{3h^2}{C(\alpha)}.$$

**Пример 7.** Какой вес груза брутто может перемещать трактор С-60, если длина поезда  $L=40$  м, ширина хода саней  $b=3,4$  м, толщина ледяного покрова  $h=0,60$  м?

**Решение.**

Определяем последовательно необходимые значения. Характеристика льда:

$$l = \sqrt[4]{28125h^3} = \sqrt[4]{28125 \cdot 0,6^3} = 8,83 \text{ м.}$$

Приведенный радиус распределения нагрузки:

$$r = \sqrt{\frac{b}{2} \cdot \frac{L}{2}} = \sqrt{\frac{3,4}{2} \cdot \frac{40}{2}} = 5,83 \text{ м.}$$

Коэффициент распределения нагрузки:

$$\alpha = \frac{r}{l} = \frac{5,83}{8,83} = 0,66.$$

Для  $\alpha=0,66$  характеристика удельного напряжения льда равна

$$C(\alpha) = 0,005.$$

Величину груза получим равной

$$Q = \frac{3h^2}{C(\alpha)} = \frac{3 \cdot 0,6^2}{0,005} = 276 \text{ т.}$$

*Пример 8.* Трактор С-60 должен перемещать порожняк из 20 саней в составе; вес каждой саней  $q=2 \text{ т}$ , длина состава  $L=120 \text{ м}$ . Определить необходимую толщину льда.

*Решение.*

В данном случае толщину льда следует определять по весу трактора.

При  $Q=10 \text{ т}$  получим:

$$h = 10 \sqrt[3]{Q} = 10 \sqrt[3]{10} = 32 \text{ см.}$$

### § 13. Нормы толщины льда для некоторых тягачей

Приведенные материалы показывают, что расчет необходимой толщины ледяного покрова можно делать с достаточной степенью точности для рельсового и для безрельсового транспорта по формуле:

$$h = 10 \sqrt[3]{Q}.$$

Допускаемая толщина льда для некоторых тяговых машин, подсчитанная по этой формуле, приведена в табл. 8.

Таблица 8

Тип тягача	Вес Q в т	h см
Трактор ЧТЗ-60	10	32
" ЧТЗ-65	11,2	33
" ЧТЗ СГ-65	12	35
Мотовоз Калужского завода колеи 750 мм 0-2-0	8	28
Мотовоз Калужского завода колеи 750 мм 0-2-0	14	37
Мотовоз Одесского завода колеи 750 мм 0-2-0	6	24
Мотовоз Одесского завода колеи 750 мм 0-2-0	16	40
Паровоз Коломенского завода колеи 750 мм 0-4-0 № 159	16	40
Автомашинка ГАЗ-АА с нагрузкой	3,15	17
" ЗИС-5	6,6	24
Паровоз 0-4-0 серии Ов	52,5	73
Паровоз Коломенского завода колеи 750 мм 0-4-0 № 157	25,0	51

### § 14. Сравнение методов расчета

Сравним на конкретных примерах результаты расчета, получаемые по методу Бернштейна и методу аналогии.

*Пример 9.* Сопоставить результаты расчета по методу Бернштейна и методу аналогии, если вес саней брутто  $Q=20 \text{ т}$ , ши-

рина хода саней  $b=3,4 \text{ м}$  и продольная база (расстояние между центрами нижних брусьев)  $L=6 \text{ м}$ .

Расчет по методу аналогии  
Необходимая толщина льда:

$$h = 10 \sqrt[3]{Q} = 10 \sqrt[3]{20} = 10 \cdot 4,47 = 44,7 \cong 45 \text{ см.}$$

Расчет по методу Бернштейна

В данном случае расчет ведется обратным ходом, т. е. для толщины льда  $h=45 \text{ см}$  подсчитывают величину груза  $Q$ .

Характеристика льда

$$l = \sqrt[3]{28125h^3} = \sqrt[3]{28125 \cdot 0,45^3} = 7,1 \text{ м;}$$

приведенный радиус распределения нагрузки:

$$r = \sqrt{\frac{b}{2} \cdot \frac{L}{2}} = \sqrt{\frac{3,4}{2} \cdot \frac{6}{2}} = 2,24 \text{ м;}$$

коэффициент распределения нагрузки:

$$\alpha = \frac{r}{l} = \frac{2,24}{7,1} = 0,32;$$

характеристика удельного напряжения льда по графику:

$$C(\alpha) = 0,028;$$

величина веса груза:

$$Q = \frac{3h^2}{C(\alpha)} = \frac{3 \cdot 0,45^2}{0,028} = \frac{0,6075}{0,028} = 21,7 \text{ т.}$$

Если принять последнюю величину нагрузки за 100%, то величина веса, соответствующая расчету по методу аналогии, будет составлять 92%.

*Пример 10.* Сопоставить необходимую толщину ледяного покрова для одинаковых величин нагрузок, если  $r=1,62$ .

*Решение.*

В табл. 9 определена нагрузка  $Q$  для заданной толщины льда по методу Бернштейна, а по методу аналогии определена для этой нагрузки величина  $h$ .

Таблица 9

Вес груза Q в т	Метод Бернштейна		Метод аналогии	
	h см	%	h см	%
5,0	20	100	22	110,0
9,6	30	100	31	103,3
15,0	40	100	39	97,5
21,4	50	100	46	92,0
30,0	60	100	55	91,7

Приведенные примеры показывают, что на практике можно пользоваться расчетом по методу аналогии, так как он прост, легко выполним и дает вполне удовлетворительные результаты. Сравнительные данные расчета по методу аналогии и по методу Бернштейна для  $r=1,22$  м и  $r_1=1,62$  м приведены на рис. 7. Из рисунка видно, что при расчете веса груза по методу аналогии для толщины льда 20—35 см (в зависимости от  $r$ ) запас прочности получается более 2,25.

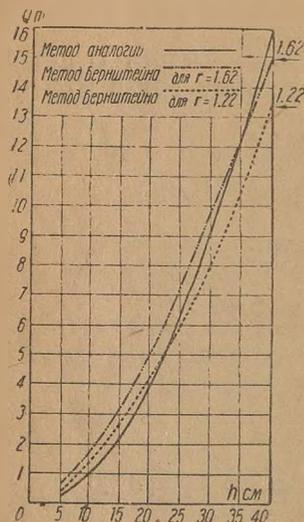


Рис. 7. Кривые сравнительного веса груза в зависимости от толщины льда, вычисленные по методам Бернштейна и аналогии

### § 15. Применение метода инж. Бернштейна к расчету льда для тракторных и автогужевых дорог

Инж. Бернштейн свою теорию построил на основе опытов работы железнодорожных ледяных переправ. Поэтому некоторые специалисты до сих пор считают, что для обычных ледяных переправ пользоваться формулами инж. Бернштейна без соответствующих поправок нельзя. Вот что пишет, например, по этому вопросу проф. Дубелир и др. (4): „При подсчете нагрузки по железнодорожным формулам следует принять в запас прочности допускаемое напряжение  $\sigma = 10 - 11$  кг/см<sup>2</sup> и уменьшение на 20—30% против полученного расчетного груза в силу отсутствия налстройки на льду (шпалы, продольные брусья и др)“.

Здесь еще раз следует заметить, что инж. Бернштейн рекомендовал принимать максимально допускаемое напряжение льда на изгиб  $\sigma = 22$  кг/см<sup>2</sup>.

Указанные поправки являются ошибочными потому, что формулы инж. Бернштейна выведены без учета работы под нагрузкой верхнего строения пути. Если сделать подсчет так, как рекомендует проф. Дубелир, то получаются значительные расхождения с практическими данными. Так, при  $\sigma = 22$  кг и нагрузке  $Q = 10$  т необходима толщина льда  $h = 25$  см; при  $\sigma = 11$  кг/см<sup>2</sup> и уменьшении нагрузки на 30% толщина льда должна быть:

$$h_1 = h \cdot 2 \cdot 1,3 = 25 \cdot 2 \cdot 1,3 = 65 \text{ см.}$$

По расчетам различными методами при  $\sigma = 12$  кг/см<sup>2</sup> необходимая толщина льда для этой нагрузки равна  $h = 30 - 31$  см. По некоторым нормам военно-инженерной службы нагрузке  $Q = 25$  т должна соответствовать для обычных ледяных переправ толщина льда  $h = 40$  см.

### § 16. Сравнение теоретических расчетов с практическими данными

Мы рассмотрели сравнительные данные, получающиеся на основе того или иного метода расчета. Теперь необходимо сопоставить теоретические расчеты с практическими данными. В качестве таких данных нами взяты приводимые в литературе по военно-инженерному делу (5,12) нормы допустимой толщины льда в зависимости от веса груза (табл. 10).

Таблица 10

Наименование груза	Вес груза Q в т	Толщина льда в см			Литературные источники
		метод Бернштейна	метод аналогии	практические данные	
Легковой автомобиль	1,6	12	12,6	12—15	Н. Иванов, „Краткий тактический справочник“, 1936 г.
Орудие 76 мм образца 1902 г.	2,0	14	14	13 и более	То же
Машины весом	6,0	25	24	25—30	То же
Грузы весом	3,5	17	19	15—25	Фальберг и Грен, „Военно-инженерное дело“, 1934 г.
„ „	45	72	67	75	То же

Из табл. 10 видно, что расчетные данные близко совпадают с практическими. Получающиеся значения толщины льда  $h$  по формуле:

$$h = 10 \sqrt{Q \text{ см}}$$

имеют вполне достаточный запас прочности. Об этом свидетельствует следующее утверждение: „Перекатка нормальных товарных вагонов или платформ весом брутто не более 15 т, следующих поодиночке, может быть начата по достижении ледяным слоем толщины не менее 20 см“ (8). Иначе говоря, минимально допускаемая толщина должна быть:

$$\frac{h^2}{20^2} = \frac{Q}{15}$$

откуда

$$h = 5,2 \sqrt{Q \text{ см.}}$$

## § 17. Некоторые выводы из практики работы железно-дорожных ледяных переправ

Специальными исследованиями работы железнодорожных ледяных переправ установлено следующее<sup>(8)</sup>:

1) величина прогибов льда растет приблизительно пропорционально общему весу сцепленных вместе вагонов;

2) прогибы под действием одного-двух сцепленных вместе вагонов растут пропорционально общему весу этих вагонов; по мере увеличения числа вагонов прогибы начинают расти более медленно; например, при составе 28 цистерн прогибы не превосходят шестикратного прогиба от одной цистерны;

3) площадь льда, оседающая под весом вагонов, имеет в плане овальную или эллиптическую форму, вытянутую вдоль пути;

4) прогиб ледяной поверхности от одного вагона приближается к площади круга радиусом  $r = 30$  м;

5) прогиб льда при стоянке груза на одном месте со временем увеличивается;

6) опыты, проводившиеся при скорости движения до  $v = 10$  км/час., показали, что изменение в указанных пределах скорости движения не влияет на изменение величины прогибов льда.

Из этих указаний должно следовать, что на льду, особенно небольшой толщины, нельзя допускать стоянки грузов. Интервалы при движении грузов должны быть не менее 60 м при толщине льда до 60 см и не менее 30 при большей толщине льда. При устройстве разъездов на ледяной переправе необходимо, чтобы оси линий разъездов проходили на расстоянии не менее 50—60 м друг от друга.

## § 18. Некоторые вопросы изыскания ледяных переправ

Проектированию ледяных переправ должны предшествовать работы по их изысканию. Проектирование и изыскание ледяных переправ не входят в нашу задачу, поэтому здесь приводятся лишь некоторые вопросы, связанные с изысканием ледяных переправ.

Для установления периода работы ледяной переправы должны быть выяснены начало замерзания и вскрытия реки, химический состав воды и среднемесячные отрицательные температуры воздуха.

Вес груза, который может быть переправлен по льду, должен определяться по замеренной в природе толщине льда. Расстояние, через которое должны производиться замеры толщины льда, зависит от ширины и характера водоема (река, озеро и др.). На малых реках определять толщину льда нужно чаще, чем, например, на больших озерах. В качестве расчетной должна быть принята наименьшая толщина льда.

Особенно тщательно следует выбирать места подходов к водоемам. Спуск на ледяной покров должен быть плавным, а ледяной покров достаточно надежным (отсутствие полыней, достаточная толщина льда и т. д.). При отсутствии плавных естественных подходов к водоему должны быть запроектированы въезды (съезды) с применением местных строительных материалов (снег, древесина, камни, хворост и др.).

В тех местах, где толщина ледяного покрова недостаточна, необходимо усилить прочность ледяного покрова (прокладки верхнего строения для безрельсового транспорта, искусственное намораживание льда и др.).

Толщину ледяного покрова необходимо определять непосредственными измерениями независимо от времени начала работы ледяной переправы и величины среднесуточных отрицательных температур воздуха. Изменение воляного режима на небольших реках может создать ледяные арочные мосты с недостаточной толщиной льда в средней части переправы, которая в первую очередь подвергается разрушению.

## Глава III

### УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

#### § 19. Верхнее строение пути по льду

Для практики безрельсового транспорта интересно знать, насколько верхнее строение пути, например лежневая дорога, проложенная по льду, увеличивает прочность ледяной переправы.

В своей практической и исследовательской работе инженеры железнодорожного транспорта пришли к выводу, что „работа ледяного слоя на изгиб по всей площади, на которую распределяется давление, почти не зависит от конструкции пути“... „при достаточной толщине ледяного слоя увеличение или уменьшение длины поперечин не может заметным образом влиять на ширину ледяного слоя, работающего на изгиб и участвующего в поддержании на плаву нагрузки“<sup>(8)</sup>.

Однако на основе приведенных указаний неправильно было бы отрицать роль верхнего строения пути, проложенного по льду. На рис. 8 (стр. 26) изображена конструкция лежневой дороги, проложенной по льду на участке одной из лесовозных дорог треста Кареллес<sup>(4)</sup>. На рис. 9 (стр. 26) представлена переносная щитовая дорога<sup>(12)</sup>.

Верхнее строение пути по льду имеет тем большее значение, чем тоньше лед. Это можно подтвердить соответствующими расчетами. Предположим, что по льду должна быть построена лежневая дорога при поперечных шпалах диаметром  $d = 15$  см расположенных на расстоянии  $b = 1$  м друг от друга. Выясним какое влияние оказывает верхнее строение пути на работу ледяной переправы в целом при толщине льда  $h_1 = 20$  см и  $h_2 = 40$  см

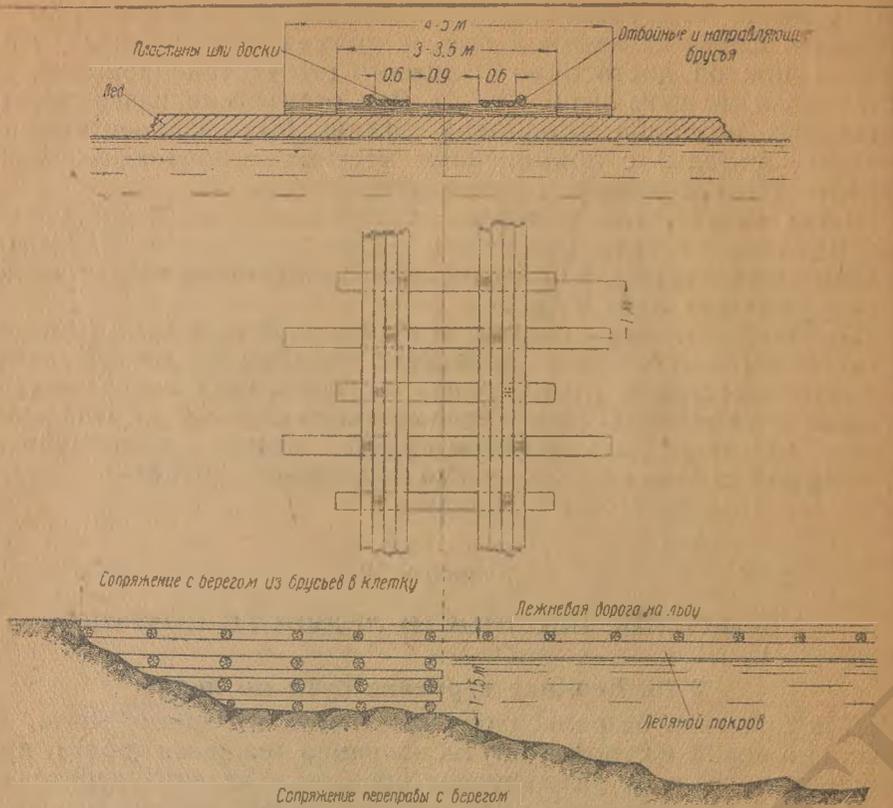


Рис. 8. Лежневая дорога по льду

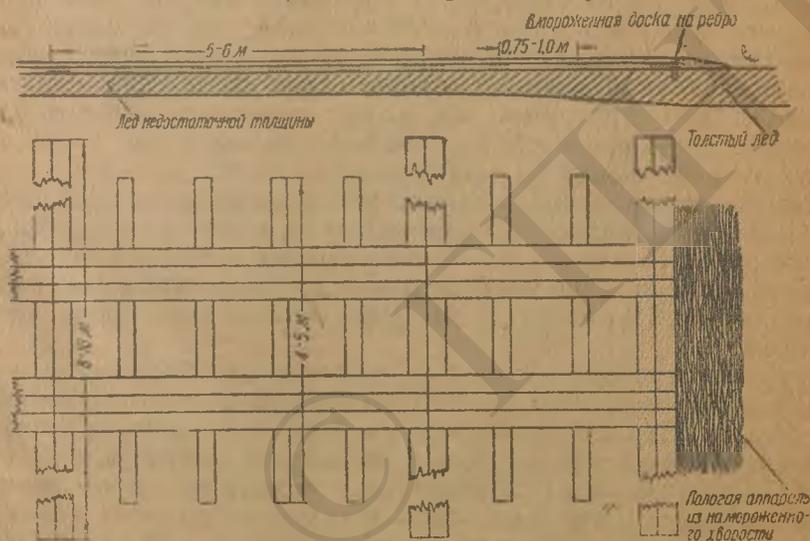


Рис. 9. Щитовая дорога по льду

Из курса сопротивления материалов (11) известно, что изгибающий момент распределяется между двумя совместно изгибаемыми элементами пропорционально их жесткостям, т. е.

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\epsilon_1 I_1}{\epsilon_2 I_2}$$

Вычислим жесткости для шпалы и льда принятых размеров, если модуль упругости для льда  $\epsilon_1 = 300\,000 \text{ кг/см}^2$  и для дерева  $\epsilon_2 = 120\,000 \text{ кг/см}^2$ . Соответствующие моменты инерции определяются по формулам:

$$I_1 = \frac{\pi d^4}{64} \text{ см}^4; \quad I_2 = \frac{bh^3}{12} \text{ см}^4.$$

Численные значения подсчетов приведены в табл. 11.

Таблица 11

Материал	Модуль упругости $\epsilon \text{ кг/см}^2$	Момент инерции $I \text{ см}^4$	Жесткость $\frac{\epsilon I}{\text{см}^2}$
Шпала $d=15 \text{ см}$	120 000	2 485	298 200 000
Ледяной брус $20 \times 100$	30 000	66 666	1 999 980 000
Ледяной брус $40 \times 100$	30 000	533 333	15 999 990 000

Отношение изгибающих моментов будет равно:

а) для льда толщиной  $h_1 = 20 \text{ см}$

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{1}{6,7}$$

б) то же при  $h_2 = 40 \text{ см}$

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{1}{54}$$

Если принять величину изгибающего момента льда за 100%, то изгибающий момент для верхнего строения пути при  $h_1 = 20 \text{ см}$  будет составлять от него  $\sim 15\%$ , а при  $h_2 = 40 \text{ см}$  лишь  $\sim 18\%$ .

Из этого расчета видно, что при достаточной толщине ледяного покрова роль верхнего строения пути совершенно ничтожна и устраивать настил по льду для усиления его прочности не имеет смысла. При тонком же ледяном покрове настил по льду значительно увеличивает прочность ледяной переправы.

## § 20. Искусственное намораживание льда

Прочность ледяного покрова нередко увеличивают с помощью искусственного намораживания льда сверху. Это мероприятие применимо исключительно в тех случаях, когда естественная толщина ледяного покрова недостаточна для перевозки того или иного груза. Искусственное намораживание может быть рекомендовано лишь при температурах воздуха не выше  $-10^{\circ}\text{C}$ , так как при более высокой температуре на это требуется продолжительное время.

Наши исследования (?) показали, что продолжительность образования льда на ледяных дорогах может быть определена по эмпирической формуле<sup>1</sup>:

$$t = \frac{790 \cdot h}{\theta} \text{ мин.},$$

где:

790 — постоянный опытный коэффициент,

$h$  — толщина слоя льда в см,

$\theta$  — температура воздуха в градусах Цельсия, взятая с обратным знаком.

На рис. 10 представлена зависимость времени образования ледяного слоя от температуры воздуха. Время образования ледяного слоя можно подсчитать по формуле Ньютона:

$$t = \frac{60q}{\alpha(T - \theta)F}$$

или при  $F = 1$

$$t = \frac{60q}{\alpha T} \text{ мин.},$$

где:

$q$  — количество теплоты в ккал., отдаваемое водой с  $1 \text{ м}^2$  при ее замерзании,

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,

$T_1$  — разность температур окружающего воздуха и налитой воды в градусах Цельсия по абсолютной шкале.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  в зависимости от температуры воздуха при силе ветра 0—3 балла по шкале Бофорта можно определить по эмпирической формуле:

$$\alpha = 28 + \theta \text{ ккал/м}^2\text{ч}^{\circ}\text{C}.$$

<sup>1</sup> Соответствие продолжительности образования льда из воды, налитой на лед, вычисленной по этой формуле, подтверждается данными полковника Хренова (Полковник Хренов, О переправах по льду, журн. „Техника и вооружение“, № 12, 1939 г.).

Здесь  $\theta$  — температура воздуха в градусах Цельсия, взятая с обратным знаком. Графически это изменение представлено на рис. 11. Обе приведенные формулы дают сравнительно мало отличающиеся друг от друга результаты для температуры замерзающей воды  $5-6^{\circ}\text{C}$ .

В том случае, когда температура налитой на лед воды значительно отличается от указанной, предпочтительнее пользоваться формулой Ньютона, так как она учитывает начальную температуру воды.

При этом, как видно из формулы, следует предварительно определить значения  $q$ ,  $\alpha$  и  $T_1$ .

На рис. 10 представлена продолжительность образования ледяного слоя толщиной от 1 до 3 см в зависимости от температуры окружающего воздуха. Время, необходимое на замерзание той или иной толщины слоя воды, уменьшается при умеренном ветре на 10%, а при сильном ветре на 30% по сравнению с тем, когда сила ветра равна 0—3 баллам по шкале Бофорта.

Смерзающиеся слои льда при различной температуре воздуха и намораживании воды на чистый лед хотя и имеют в поперечном разрезе ярко выраженную слоистость, но получают достаточно большой прочности, и при механическом воздействии слои не разъединяются. Есть основания полагать, что механические свойства такого искусственного льда приближаются к свойствам естественного. Все изложенное о наращивании льда относится к пресной воде и неприменимо к воде, имеющей в своем составе соли, растворенные гуминовые кислоты и т. д.

Формулы, определяющие скорость наращивания льда, можно рассмотреть на следующем примере.

**Пример 11.** Определить время, необходимое для образования ледяного слоя толщиной  $h=1 \text{ см}$  при температуре воздуха  $\theta = -22^{\circ}\text{C}$ , если температура налитой на лед воды  $T = 6^{\circ}\text{C}$ .

**Решение.**

По эмпирической формуле:

$$t = \frac{790 \cdot h}{\theta} = \frac{790 \cdot 1}{22} = 36 \text{ мин.}$$

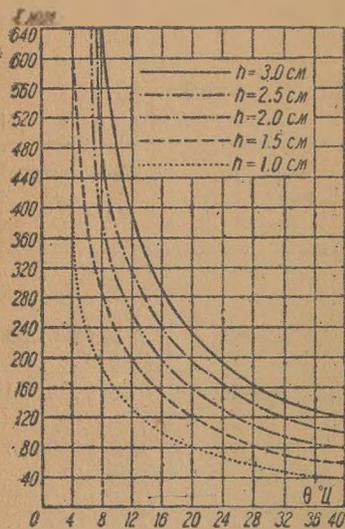


Рис. 10. Зависимость времени образования ледяного слоя от температуры воздуха

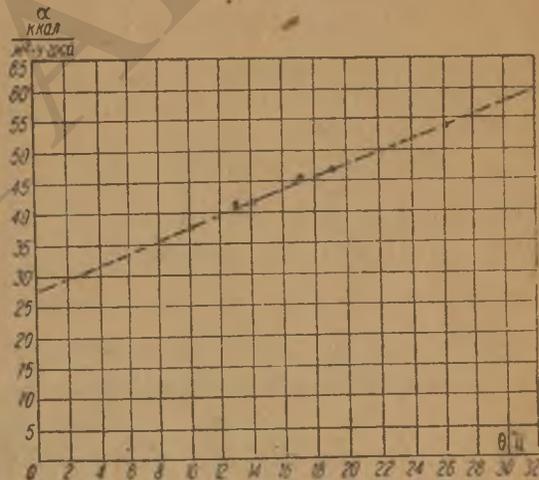


Рис. 11. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры воздуха

По формуле Ньютона:

$$t = \frac{60q}{\alpha(T - \theta)F}$$

или

$$t = \frac{60q}{\alpha T_1}$$

Коэффициент теплоотдачи при данной температуре будет равен  $\alpha = 28 + \theta = 28 + 22 = 50$  ккал/м<sup>2</sup>ч°Ц.

Количество теплоты  $q$ , которое выделит вода с площади  $F = 1$  м<sup>2</sup> при толщине  $h = 1$  см, определим, вычислив предварительно ее объем:

$$V = F \cdot h = 1 \cdot 0,01 = 0,01 \text{ м}^3, \text{ или } p = 10 \text{ кг.}$$

Величину  $q$  получим равной:

$$q = pT + p\lambda = 10 \cdot 6 + 10 \cdot 80 = 860 \text{ ккал.}$$

Разность температур по абсолютной шкале будет:

$$T_1 = T - \theta = (T + 273) - (\theta + 273) = (6 + 273) - (-22 + 273) = 28$$

Подставляя соответствующие данные, получим:

$$t = \frac{60q}{\alpha T_1} = \frac{60 \cdot 860}{50 \cdot 28} = 36,8 \text{ мин.}$$

## § 21. Деформация ледяного покрова в связи с изменением температуры воздуха

На небольших реках и озерах трещины, образующиеся под влиянием температурных колебаний, не могут служить препятствием при переправах по льду. На больших же водоемах образующиеся трещины сильно препятствуют переправам. Ширина ледяных трещин, например на Байкальском озере, достигает иногда до 2 м.

Образование трещин объясняется изменением объема льда в связи с изменением температуры воздуха. Линейный коэффициент расширения льда равен 0,000052—0,000053; следовательно, один километр ледяного покрова при понижении температуры от —5° до —20°Ц сжимается более чем на 0,75 м.

Вот что говорится о ледяных трещинах на озере Байкал и их действии на железнодорожную переправу в восемнадцатом сборнике отдела инженерных исследований. Ширина трещин под рельсами и нажимах была настолько велика, что рельсы лопались, болты и скрепления размывались со страшной силой, и путь разрушался на протяжении нескольких десятков метров. В первые дни укладки пути по льду трещины и нажимы были настолько часты и так сильно портили произведенные работы, что были

моменты, когда осуществление ледяной переправы через озеро казалось почти невозможным" (8).

Верхнее строение пути уменьшает вредное влияние трещин в ледяном покрове. Это подтверждают и исследования работы ледяных железнодорожных переправ.

„Применение длинных поперечин необходимо для того, чтобы в случае появления продольных (вдоль пути) трещин связать обе части ледяного слоя, пока трещина не заполнится водой и разделенные трещиной части льда не смерзнутся вновь в одно целое" (8).

## ВЫВОДЫ

1. Расчет продолжительности и толщины образования ледяного покрова озер и медленно текущих рек в зависимости от среднесуточных температур воздуха рекомендуется производить по практической формуле проф. Стефана:

$$h = 3 \sqrt{\theta t} \text{ см и } t = \frac{h^2}{9\theta} \text{ сут.}$$

2. Расчет продолжительности и толщины образования ледяного покрова на перекатах рек можно производить по формуле, предложенной инж. Быдиным:

$$h_1 = 2 \sqrt{\theta t} \text{ см, } t = \frac{h^2}{4\theta} \text{ сут.}$$

3. Отмеченные в пп. 1 и 2 расчеты должны считаться ориентировочными и приложимыми не ко всем типам пресноводных открытых водоемов.

4. Расчет толщины ледяного покрова и веса груза можно производить по следующим формулам: для пресноводных водоемов:

$$h = 10 \sqrt{Q} \text{ см и } Q = \frac{h^2}{10} \text{ т;}$$

для соленоводных водоемов:

$$h_1 = 100 \sqrt{3Q_1} \text{ см и } Q_1 = \frac{h^2}{300} \text{ т.}$$

5. Расчет льда по методу инж. Бернштейна и по методу аналогии дает близкие результаты. Расчет по методу аналогии ледяного покрова небольшой толщины дает отклонения максимум  $\pm 10\%$  по сравнению с результатами, получающимися по методу Бернштейна.

6. Расчет льда для поездной вывозки рекомендуется производить по методу инж. Бернштейна с проверкой толщины льда для тягача по методу аналогии.

7. Приведенные в настоящей работе примеры расчетов и сравнение их с практическими данными показывают, что вы-

бранные нами значения модуля упругости  $\varepsilon=30\,000\text{ кг/см}^2$  и допускаемого напряжения льда на изгиб  $\sigma=12\text{ кг/см}^2$  в достаточной степени надежны.

8. Верхнее строение пути по льду для безрельсового транспорта имеет существенное значение при небольшой толщине льда и может быть совершенно ненужным при достаточной толщине ледяного покрова небольших водоемов.

9. Верхнее строение пути по льду и для рельсового и для безрельсового транспорта имеет большое значение на крупных водоемах, когда температурные деформации льда могут оказывать сильное влияние на надежность работы ледяных переправ.

10. Несмотря на то, что имеются методы расчета ледяных переправ, многие вопросы еще не выяснены ни теоретически, ни опытным путем. Так как ледяные переправы имеют довольно большое значение в транспорте, соответствующие учреждения должны заняться исследованием работы ледяных переправ в различных условиях.

#### Литература

1. Ф. И. Быдин, Изучение роста льда в природных условиях, Изв. Научно-исследовательского института гидротехники, 4, 1932.
2. Проф. Б. П. Вейнберг, Классификация методов нахождения закономерностей, относящихся к изменению толщины ледяного покрова с течением времени, 1938 (рукопись).
3. Журнал „Водные пути и шоссейные дороги“, № 1, 1916.
4. Проф. Г. Д. Дубелир, Г. Ф. Захаров, В. И. Тиль, Эксплуатация автогужевых дорог, Гострансиздат, 1935.
5. Н. Иванов, Краткий тактический справочник, Госвоениздат, 1936.
6. Доц. А. Н. Комаровский, Структура и физические свойства ледяного покрова пресных вод, Госэнергоиздат, 1932.
7. Инж. М. М. Корунов, Скорость образования льда на ледяных дорогах, журнал „Лесная индустрия“, № 2, 1939.
8. Ледяные переправы, Восемнадцатый сборник отдела инженерных исследований. НКПС, Транспечать, 1929.
9. Работы по ледоведению под ред. проф. Б. П. Вейнберга. „Труды Арктического научно-исследовательского института Главсевморпути при СНК СССР“, изд. Главсевморпути, 1938.
10. Инж. А. М. Соколовский, Наледи и методы борьбы с ними на уральских реках, 1937 (рукопись).
11. Проф. С. П. Тимошенко, Курс сопротивления материалов. Госиздат, 1928.
12. В. Фальберг, С. Грен, Военно-инженерное дело, Учебник для бронетанковых школ РККА, Госвоениздат, 1934.
13. Prof. H. T. Van nes, Ice Engineering.